

# Studi Eksperimental Efek Penempatan Silinder Sirkular di Depan Sudu *Returning* terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius

Ahmad Rifqi Romadhani dan Triyogi Yuwono

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

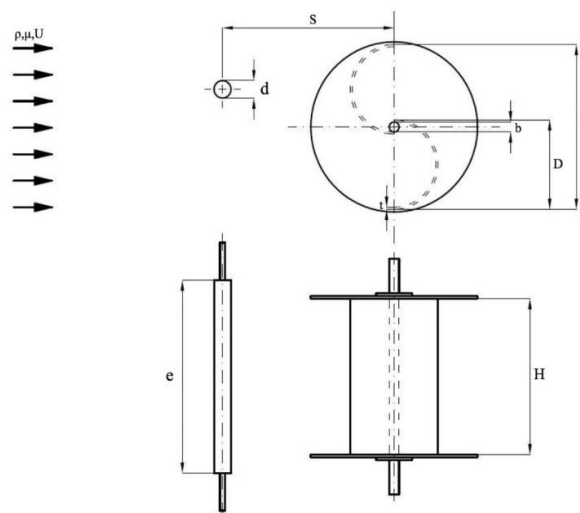
e-mail: triyogi@me.its.ac.id

**Abstrak**—Indonesia mempunyai potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer tersebut. Salah satu sumber energi yang berpotensi besar untuk dikembangkan secara optimal adalah energi angin. Energi angin di Indonesia mempunyai potensi sebesar 60,6 GW dan hanya sekitar 3.1 MW pemanfaatannya. Karakteristik angin di Indonesia memiliki rata-rata kecepatan 2 m/s sampai dengan 6 m/s. Alat yang cocok untuk kondisi ini yaitu turbin angin. Dari data kecepatan angin yang tidak terlalu besar makanya sangat cocok untuk memilih turbin angin jenis Savonius sebagai pemanfaatan energi angin di Indonesia. Studi eksperimen yang dilakukan menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua sudu dengan dimensi yaitu diameter sudu turbin ( $D$ ) sebesar 165,2 mm, tinggi ( $H$ ) sebesar 294,4 mm, diameter poros ( $b$ ) sebesar 19 mm, dan diameter *end plate* ( $D_o$ ) sebesar 321 mm. Penelitian ini menggunakan rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin  $d/D$  sebesar 0,2 dengan jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin  $S/D = 2,3$  dan variasi kecepatan aliran udara 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 (m/s). Berdasarkan pengukuran didapatkan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa dengan menambahkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat meningkatkan kinerja turbin angin Savonius. Hal ini berdasarkan meningkatnya nilai torsi statis turbin, *Coefficient of Power*, dan *Coefficient of Moment* dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Peningkatan nilai tertinggi diperoleh pada kecepatan angin 5 m/s dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak  $S/D = 2,3$ ,  $d/D = 0,2$  diperoleh peningkatan CoP maksimum sebesar 28,82% dan pada kecepatan 4 m/s diperoleh peningkatan CM maksimum sebesar 19,23%. Namun penggunaan silinder pengganggu dengan ukuran  $d/D = 0,2$ , dan jarak  $S/D = 2,3$  untuk semua variasi kecepatan belum mampu menyebabkan turbin Savonius memiliki *self-starting* pada semua posisi angular sudu.

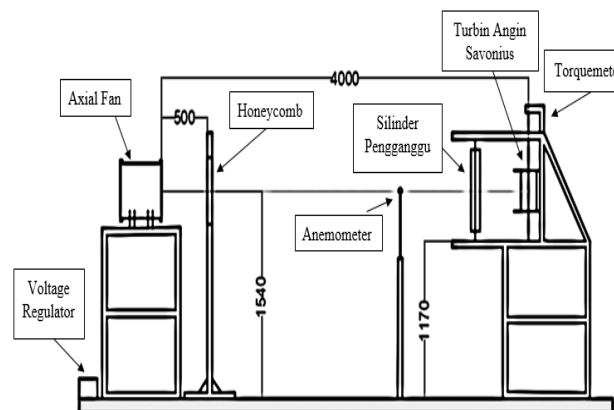
**Kata Kunci**—Turbin Angin Savonius, Silinder Pengganggu, *Coefficient Of Power*, *Coefficient Of Moment*, Torsi Statis.

## I. PENDAHULUAN

INDONESIA mempunyai potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer tersebut. Total potensi energi terbarukan ekuivalen 442 GW digunakan untuk pembangkit listrik, sedangkan BBN dan Biogas sebesar 200 ribu Bph digunakan untuk keperluan bahan bakar pada sektor transportasi, rumah tangga, komersial dan industri. Pemanfaatan EBT untuk pembangkit listrik tahun 2018 sebesar 8,8 GW atau 14% dari total kapasitas pembangkit listrik (fosil dan non fosil) yaitu sebesar 64,5 GW. Minimnya pemanfaatan EBT untuk ketenagalistrikan disebabkan masih relative tingginya harga produksi pembangkit berbasis EBT, sehingga sulit bersaing dengan pembangkit fosil terutama batubara. Kapasitas



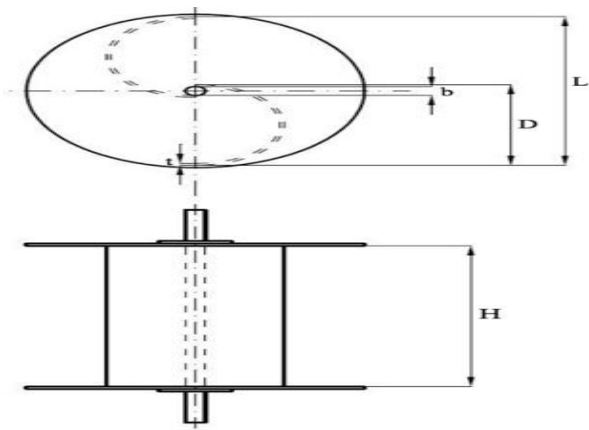
Gambar 1. Skema Penelitian (Pandangan Atas dan Samping).



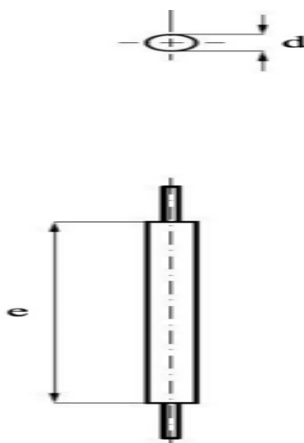
Gambar 2. Konfigurasi Instalasi Eksperimen.

pembangkit tenaga listrik sampai dengan tahun 2018 mencapai 64,5 GW atau naik sebesar 3% dibandingkan kapasitas tahun 2017. Karakteristik angin di Indonesia memiliki rata-rata kecepatan 2 m/s sampai dengan 6 m/s. Alat yang cocok untuk kondisi ini yaitu turbin angin. Dari data kecepatan angin yang tidak terlalu besar makanya sangat cocok untuk memilih turbin angin jenis Savonius sebagai pemanfaatan energi angin di Indonesia.

Turbin Savonius memiliki bentuk yang cukup sederhana yaitu menyerupai huruf S yang menyebabkan turbin ini bisa menerima energi angin dari segala arah dan dengan kecepatan yang rendah. Cara kerja turbin jenis ini adalah dengan menerima gaya *drag* dari aliran angin yang menyebabkan torsi dan membuat rotor turbin berputar. Torsi yang memutar rotor turbin ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh



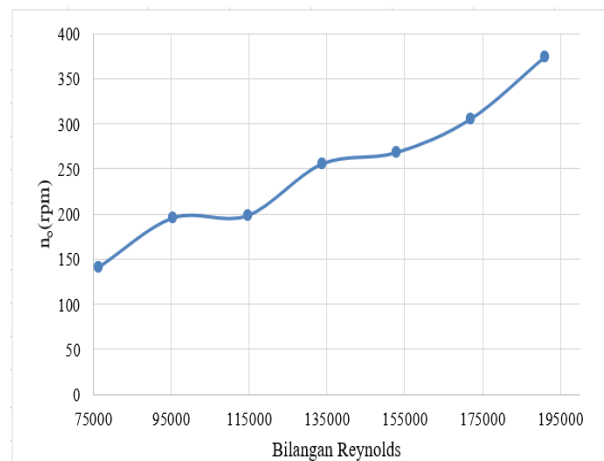
Gambar 3. Turbin Angin Savonius.



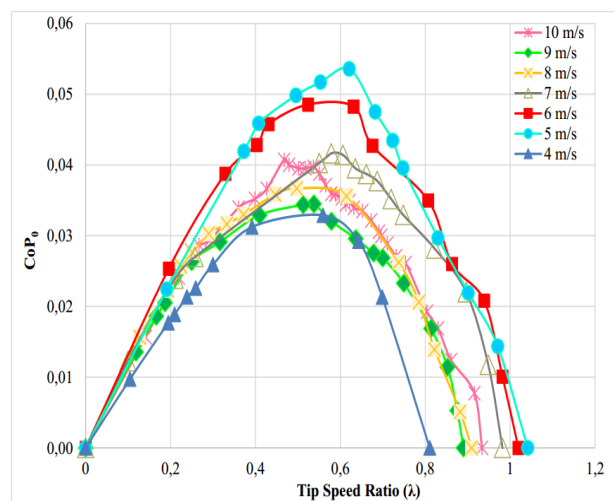
Gambar 4. Silinder Sirkular sebagai Pengganggu.

generator. Kelebihan dari turbin angin jenis Savonius adalah beroperasi pada kecepatan rendah, menerima angin dari segala arah, *Tip Speed Ratio coast*, dan instalasi dan *maintenance* mudah. Sedangkan kekurangannya adalah memiliki efisiensi terendah dibanding turbin lain. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi turbin angin jenis Savonius ini. Para peneliti terdahulu sudah pernah melakukan penelitian terkait turbin angin jenis Savonius. Berikut beberapa penelitian turbin angin Savonius yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensinya.

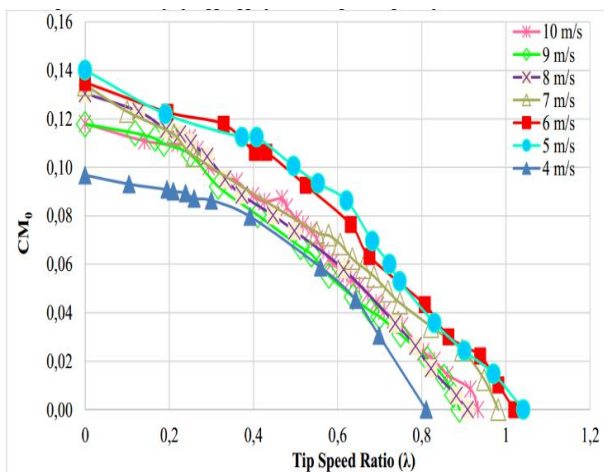
Penelitian mengenai aliran fluida yang melalui sebuah silinder diganggu oleh sebuah silinder lain yang berdiameter lebih kecil dengan memvariasikan diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ), jarak antara kedua pusat silinder ( $L/D$ ) dan harga bilangan Reynolds. Hasil penelitian tersebut mendapatkan bahwa penurunan harga koefisien *drag* ( $CD$ ) disebabkan oleh peningkatan bilangan  $Re$ ,  $d/D$  dan penurunan harga  $L/D$ . Sedangkan pengurangan *pressure drag* didominasi oleh perubahan harga  $Re$ . Kondisi optimum penurunan harga *Pressure Drag Coefficient* ( $CDP$ ) diperoleh pada nilai  $d/D = 0,25$ ;  $L/D = 2$  untuk  $Re$  kurang dari  $4,1 \times 10^4$  dan diperoleh  $CD$  sebesar 73% dibanding pada silinder tunggal. Sedangkan penurunan *Total Pressure Drag Coefficient* ( $CDT$ ) didapatkan untuk harga  $L/D = 1,75$  pada  $Re$  lebih besar dari serta didapatkan  $CDT$  sebesar 63% dibandingkan pada silinder tunggal. Dari penelitian ini mengarahkan pemakaian  $L/D$  sebagai salah satu parameter sehingga dapat mengetahui seberapa besar perubahan



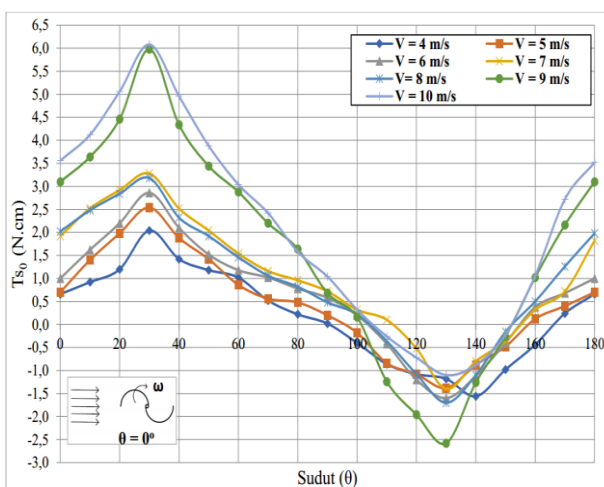
Gambar 5. Grafik Putaran Turbin Angin Tanpa Silinder Pengganggu Terhadap Bilangan Reynolds.

Gambar 6. Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ).

koefisien *drag* yang terjadi [1]. Selanjutnya penelitian untuk meningkatkan performa rotor Savonius berdasarkan geometrinya. Pada eksperimen ini, turbin angin diletakkan di depan *wind tunnel* dengan kecepatan angin pada rentang 0-13 m/s saat keluar dari *wind tunnel* dengan parameter berupa jumlah sudu turbin (dua, tiga, dan empat sudu), jumlah *stages* (*single and double stages*), *overlap ratio* (0 sampai 0,35), *aspect ratio* (0,5; 1; 2; 4; 5), dan keberadaan *end plate*. Berdasarkan penelitian tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa performa paling efisien ketika digunakan dua sudu turbin, *double stages*, tanpa *overlap ratio*, *aspect ratio* 5, dan dengan menggunakan *end plate* [2]. Penelitian menggunakan *software CFD* ialah untuk meningkatkan *Coefficient of Power* dan kemampuan *self-starting* yang sangat baik, silinder tipe I 65° dipasang aliran *upstream* dari *returning turbine* pada posisi tertentu dan bertindak sebagai faktor penentu untuk meningkatkan kinerja turbin secara aerodinamis. Dari penelitian ini didapatkan peningkatan *coefficient power* sebesar 23.61% lebih baik dibandingkan dengan turbin konvensional pada  $TSR \lambda = 0.8$  [3]. Penelitian selanjutnya juga telah dilakukan terkait meningkatkan performa turbin dengan metode eksperimen. Penelitian ini dilakukan pada  $Re$  99000 dengan variasi  $S/D = 1.4$  sampai 2.2. Dari penelitian ini didapatkan pada saat  $S/D < 1.8$  dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Maksimum



Gambar 7. Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu ( $CM_0$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ).



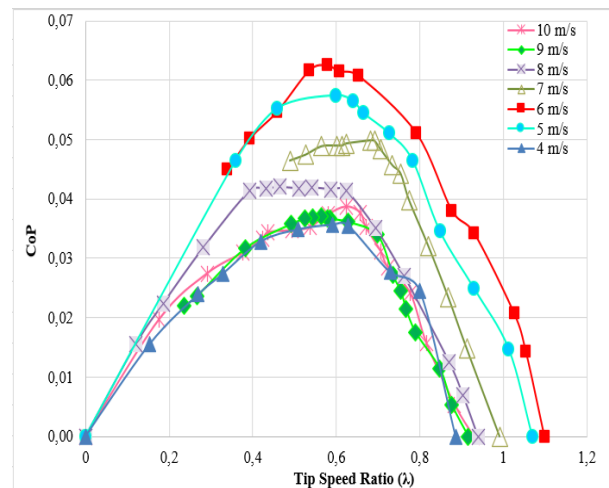
Gambar 8. Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu ( $TS_0$ ) terhadap Fungsi Sudut Blade Turbin Angin Savonius ( $\theta$ ).

performa turbin terjadi pada saat  $S/D = 1.4$  yaitu meningkat sebesar 12.2%, pada *tip speed ratio* 0.65. Namun pada saat  $S/D > 1.8$  tidak ada perubahan pada *Coefficient of Power* atau hampir sama dengan turbin konvensional. Ini sama seperti dua objek yang tidak saling mempengaruhi. Artinya saat  $S/D > 1.8$  kontrol *passive flow* tidak lagi efektif untuk meningkatkan performa turbin. [4].

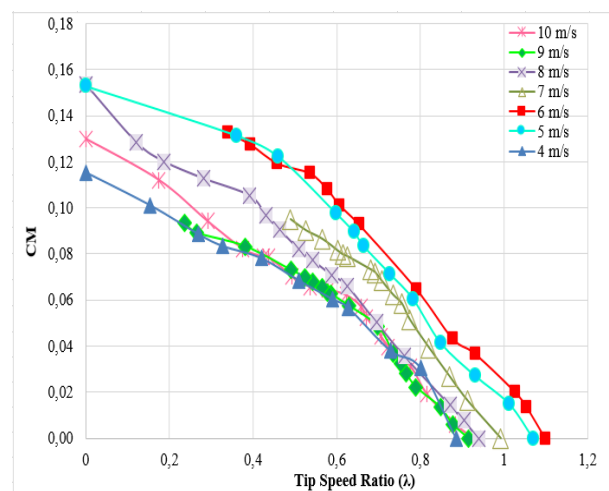
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonius terhadap performa turbin angin tersebut. Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0,2 Variasi rasio antara jarak pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius ( $S/D$ ) sebesar 2,3 dan variasi kecepatan angin bernilai 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 (m/s). Performa turbin dapat ditentukan dengan cara mengukur: Mengukur torsi statis dan dinamis turbin, *Coefficient of Power* (CoP), dan *Coefficient of Moment* (CM).

## II. METODOLOGI PENELITIAN

Gambar 1 merupakan skema penelitian (pandangan atas dan samping) dan beberapa parameter yang mempengaruhi performa turbin angin Savonius yaitu diameter *blade* (D),



Gambar 9. Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ).



Gambar 10. Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ).

densitas( $\rho$ ), viskositas udara( $\mu$ ), diameter silinder pengganggu (d), kecepatan fluida (U), tinggi turbin (H), panjang silinder(t), diameter overlap (b), jarak antara titik pusat silinder terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius (y), kecepatan putar sudu turbin Savonius ( $\omega$ ), jarak antara pusat *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu ( $S/D$ ).

### A. Skema Eksperimen

1. Jarak axial fan ke turbin : 4000 mm
2. Jarak honeycomb ke turbin : 500 mm

Konfigurasi instalasi experimental yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.

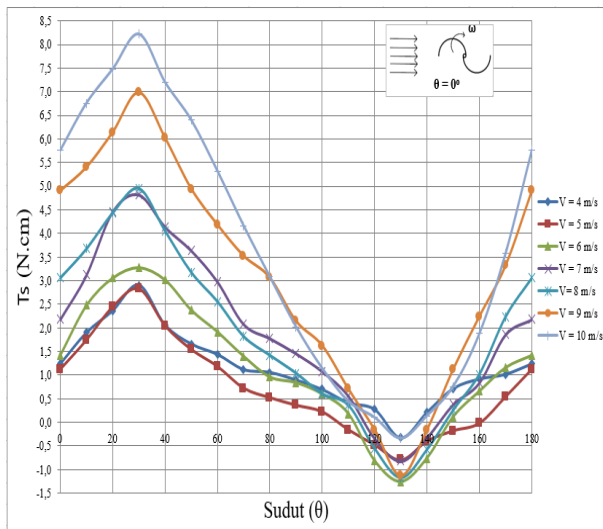
### B. Benda Uji

#### 1) Geometri Turbin Angin Savonius

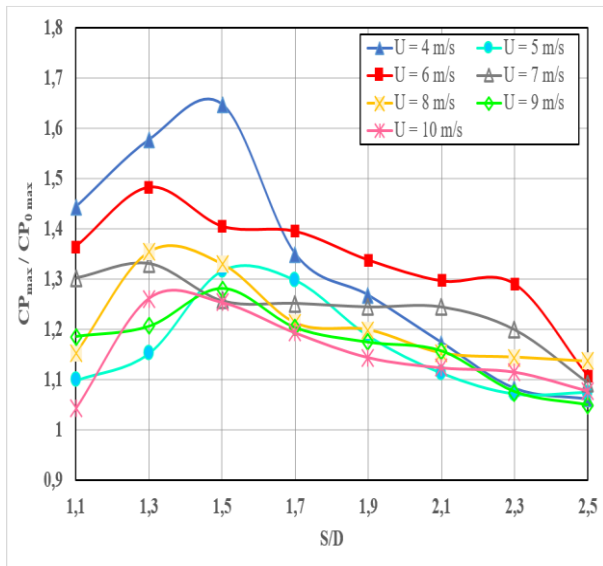
Geometri turbin angin Savonius dapat dilihat pada Gambar

#### 3. Dimensi turbin sebagai berikut:

1. Diameter (D) : 165,2 mm
2. Tinggi (H) : 294,4 mm
3. Overlap (d) : 19 mm



Gambar 11. Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu (TS) terhadap Fungsi Sudut Blade Turbin Angin Savonius ( $\theta$ ).



Gambar 12. Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) Maksimum antara Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu dan Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu ( $CoP_{max} / CoP_{0max}$ ) pada Variasi Kecepatan Udara.

## 2) Geometri Silinder Pengganggu

Geometri Silinder Pengganggu dapat dilihat pada Gambar 4. Dimensi silinder pengganggu sebagai berikut:

1. Diameter silinder pengganggu ( $d$ ) = 33 mm
2. Tinggi silinder pengganggu ( $e$ ) = 500 mm
3. Jarak dari pusat returning blade turbin angin Savonius ( $S/D$ ) = 2,3

## C. Alat Ukur

### 1) Anemometer

Anemometer yang digunakan yaitu **OMEGA HHF141** dengan akurasi pembacaan  $\pm 1\%$  atau 1digit dan range pengukuran antara 0,2 sampai 40 m/s.

### 2) Tachometer

Tachometer yang digunakan yaitu **OMEGA Seri HHT12** dengan akurasi 0,01% atau 1digit dan range pengukuran antara 5 sampai 99.999 rpm.

## 3) Torquemeter

Torquemeter yang digunakan yaitu **LUTRON Model TQ-8800** dengan high resolution 0,1 N-cm. Persamaan berikut akan digunakan untuk mencari nilai *Coefficient of Power*:

$$CoP = \frac{T_d \omega}{0.5 \rho A V^3} \quad (1)$$

$T_d$  merupakan torsi dinamis turbin,  $\omega$  merupakan putaran turbin,  $\rho$  merupakan densitas udara,  $V$  merupakan kecepatan udara, dan  $A$  merupakan luasan yang terkena udara. Nilai  $A$  dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$A = (2D - b - 2t)H \quad (2)$$

Untuk persamaan nilai *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (3)$$

Persamaan nilai *Coefficient of Moment* ( $CM$ ) dapat dicari dengan persamaan:

$$C_M = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \rho U^2 A R} \quad (4)$$

Dari persamaan (1) dan (4) didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$CoP = C_M \lambda \quad (5)$$

Pada penelitian ini data akan diolah sehingga akan mendapatkan grafik  $CoP = f(\lambda)$ ,  $CM = f(\lambda)$ , dan  $T_s = f(\theta)$ .

## III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### A. Data Tanpa Peambahan Silinder Pengganggu

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin meningkat nilai bilangan Reynolds maka putaran dari turbin angin Savonius juga meningkat. Hal ini dikarenakan kecepatan angin yang mempengaruhi kecepatan putaran turbin. Semakin tinggi kecepatan angin maka kecepatan putaran turbin semakin meningkat.

Pada Gambar 6 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) terhadap *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. nilai *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) hingga mencapai  $\lambda$  optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Berdasarkan hasil yang didapat, kecepatan optimum berada pada kecepatan 5 m/s, hal ini disebabkan karena pada kecepatan tersebut memiliki nilai  $CoP_0$  maksimum tertinggi, sehingga performa yang dihasilkan paling besar dibandingkan keenam kecepatan angin lainnya, dimana pada kecepatan 4 m/s nilai  $CoP_0$  akan meningkat sampai pada kecepatan 5 m/s dan setelah melewati kecepatan angin optimum yaitu pada kecepatan 5 m/s nilai  $CoP_0$  akan mengalami penurunan sampai pada kecepatan 10 m/s.

Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* ( $CM_0$ ) mengalami kenaikan seiring dengan penurunan nilai *Tip Speed Ratio* sampai titik optimum. Nilai ( $CM_0$ ) maksimum tertinggi terdapat pada kecepatan 5 m/s. Semua nilai  $CM_0$  maksimum pada semua kecepatan udara terjadi pada  $\lambda = 0$  yang artinya putaran turbin berhenti.



Pada Gambar 8 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada ketujuh grafik kecepatan angin tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut  $30^\circ$  kemudian turun hingga sudut  $130^\circ$  kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis negatif pada masing-masing kecepatan memiliki rentang sudut yang relatif sama. Nilai  $T_{S0}$  berdasarkan urutan  $T_{S0}$  maksimum tertinggi pada saat kecepatan 10 m/s dan  $T_{S0}$  maksimum terendah berada pada kecepatan 4 m/s terjadi pada posisi sudut  $30^\circ$ . Turbin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut  $30^\circ$  untuk seluruh kecepatan angin dan untuk torsi negatif terendah pada sudut  $130^\circ$  untuk kecepatan angin 5,6,7,8,9, dan 10 m/s serta sudut  $140^\circ$  untuk kecepatan angin 4 m/s. Pada sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$  untuk seluruh kecepatan, sudut  $120^\circ$  sampai  $180^\circ$  untuk kecepatan 5,6,7,8,9, dan 10 m/s serta pada sudut  $140^\circ$  sampai  $180^\circ$  pada kecepatan 4 m/s.

#### B. Data Dengan Penambahan Silinder Pengganggu

Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) hingga mencapai  $\lambda$  optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Berdasarkan hasil yang didapat, kecepatan optimum berada pada kecepatan 6 m/s. Terjadi pergeseran nilai kecepatan optimum antara tanpa silinder pengganggu pada kecepatan 5 m/s dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan 6 m/s. Hal ini terjadi dikarenakan pengaruh setelah diberikannya silinder pengganggu didepan *returning blade* yang menyebabkan *shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan jatuh pada permukaan *returning blade* yang akan mengganggu *boundary layer* pada *returning blade*. Terganggunya *boundary layer* pada *returning blade* membuat transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen akan lebih cepat terjadi, sehingga titik separasi akan tertunda atau mundur ke belakang. Tertundanya titik separasi pada *returning blade* ini menyebabkan gaya *drag* akan turun dan area *wake* di belakang *returning blade* akan menyempit, sehingga nilai selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* ini naik dan nilai daya juga meningkat.

Berdasarkan Gambar 10 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* (CM) mengalami kenaikan seiring dengan penurunan nilai *Tip Speed Ratio*. Terjadinya peningkatan nilai CM dibanding dengan tanpa silinder pengganggu. Jika putaran turbin semakin cepat maka turbin angin Savonius seolah – olah akan terlihat seperti dinding *solid* dimana fluida tidak dapat mencapai susu turbin dengan sempurna sehingga menyebabkan menurunnya nilai putaran sampai pada kecepatan 10 m/s. Nilai CM menurun ketika nilai *tip speed ratio* naik. Nilai *tip speed ratio* semakin besar diartikan putarannya tinggi dikarenakan beban pada turbin mengecil sehingga nilai  $T_d$  mengecil yang nantinya menyebabkan nilai CM mengecil. Begitu juga sebaliknya ketika beban ditambahkan maka putarannya rendah sehingga nilai  $T_d$  membesar yang nantinya menyebabkan nilai CM membesar sampai nilai maksimum.

Pada Gambar 11 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Terjadi peningkatan nilai torsi statis maksimum dan minimum antara tanpa silinder pengganggu dan dengan pengganggu. Pada ketujuh grafik kecepatan angin

tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut  $30^\circ$  kemudian turun hingga sudut  $130^\circ$  kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis negatif pada masing-masing kecepatan memiliki rentang sudut yang relatif sama. Nilai  $T_s$  berdasarkan urutan  $T_s$  maksimum tertinggi pada saat kecepatan 10 m/s dan  $T_s$  maksimum terendah berada pada kecepatan 4 m/s terjadi pada posisi sudut  $30^\circ$ . Turbin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut  $30^\circ$  untuk seluruh kecepatan angin dan untuk torsi negatif terendah pada sudut  $130^\circ$  untuk semua kecepatan angin. Pada sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$  untuk seluruh kecepatan, sudut  $130^\circ$  sampai  $180^\circ$  untuk semua kecepatan. Pada semua kecepatan masih mempunyai nilai torsi statis yang bernilai negatif yang artinya turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak memiliki kemampuan *self-starting* sehingga pada sudut tertentu turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Pada Gambar 12 bisa dilihat bahwa dengan S/D yang kecil antara 1,1-1,5 efektif meningkatkan kinerja dari turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan daerah *wake* yang terbentuk cenderung tidak luas, sehingga daerah yang mengalami penurunan tekanan di depan *returning blade* juga tidak luas. Akibatnya perbedaan tekanan di depan dan belakang *returning blade* tidak banyak berubah dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan pada nilai S/D besar, silinder pengganggu tidak efektif mengganggu aliran yang terjadi di *returning blade*, karena akan seperti dua buah *bluff body* yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi.

## IV. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Pada penelitian ini Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio diameter  $d/D = 0,2$  *aspect ratio*  $\approx 1$ , dan rasio jarak S/D = 1,5 diperoleh kesimpulan sebagai berikut: (1) Efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *coefficient of power* (CoP), *coefficient of moment* (CM), dan torsi statis turbin angin Savonius pada semua variasi kecepatan; (2) Efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius pada semua variasi kecepatan yang mana nilai *coefficient of power* maksimum ( $CoP_{max}$ ) tertinggi terletak pada kecepatan angin 6 m/s dengan peningkatan sebesar 28,57%; (3) Efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *coefficient of moment* (CM) turbin angin Savonius pada semua variasi kecepatan yang mana nilai *coefficient of moment* maksimum ( $CM_{max}$ ) tertinggi terletak pada kecepatan angin 6 m/s dengan peningkatan sebesar 19,21%; (4) Efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai torsi statis pada semua angular sudu. Namun belum mampu membuat turbin angin Savonius memiliki *self-starting* pada semua posisi angular sudu. Hal ini ditunjukkan dengan adanya nilai torsi negatif pada beberapa posisi angular sudu.; (5) Pada semua variasi kecepatan diperoleh hasil bahwa konsidi operasi terbaik terjadi pada rentang nilai TSR 0,5 sampai dengan 0,7.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Tsutsui and T. Igarashi, "Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 90, no. 4–5, pp. 527–541, 2002, doi: 10.1016/S0167-6105(01)00199-4.
- [2] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, and M. H. Nasef, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance," *Alexandria Eng. J.*, vol. 51, no. 1, pp. 19–25, 2012, doi: 10.1016/j.aej.2012.07.003.
- [3] G. Sakti, T. Yuwono, and W. A. Widodo, "Experimental and numerical investigation of I-65<sup>0</sup> type cylinder effect on the savonius wind turbine performance," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 19, no. 5, pp. 115–125, 2019.
- [4] T. Yuwono, G. Sakti, F. Nur Aulia, and A. Chandra Wijaya, "Improving the performance of Savonius wind turbine by installation of a circular cylinder upstream of returning turbine blade," *Alexandria Eng. J.*, vol. 59, no. 6, pp. 4923–4932, 2020, doi: 10.1016/j.aej.2020.09.009.